

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Parní generátory svislé v jaderných elektrárnách

Vertical Steam Generators in Nuclear Power Plants

Student:

Petr Nevřela

Vedoucí bakalářské práce:

prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Ostrava 2010

Zadání bakalářské práce

Student: **Petr Nevřela**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3907R004 Provoz a řízení v energetice
Téma: **Parní generátory svislé v jaderných elektrárnách**
Vertical Steam Generators in Nuclear Power Plants

Zásady pro vypracování:

Na základě rešerše literatury popište koncepci svislých parních generátorů pro jaderné elektrárny III+ generace.

Proveďte zjednodušený tepelný výpočet pro dvou smyčkové uspořádání primárního okruhu.

Tepelný výkon jaderné elektrárny 3415 MWt

Parní výkon 6940 t/hod

Tlak syté páry 7,8 MPa

Teplota chladiva v I. okruhu 298,5/330,7 °C

Tlak v I. okruhu 16,2 MPa

Seznam doporučené odborné literatury:

[1] RÉDR, M., PŘÍHODA, M. *Základy tepelné techniky*. Praha. SNTL, 1991

ISBN 80-03-00366-0

[2] SADIK KAKAC. *Boilers, evaporators, condensers*. John Wiley. USA. New York 1991

CIP 90-22486 v knihovně VŠB.

[3] HEJZLAR, R. *Stroje a zařízení jaderných elektráren*, Díl. 1, 2. Vydavatelství ČVUT v Praze. 2005.

ISBN 80-01-03190-X.

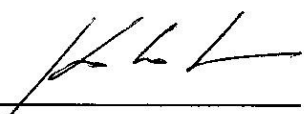
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

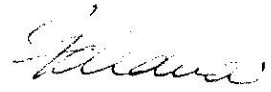
Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 18.12.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010




prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě, dne 20.5.2010

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména §35-užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60-školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava (dále už jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo-bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 20.5.2010

.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Petr Nevřela

Adresa trvalého pobytu studenta: Strahovice 201, 747 30

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

NEVŘELA, P. Parní generátory svislé v jaderných elektrárnách : bakalářská práce.

Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2010,

40 s. Vedoucí práce: Kolat, P.

Bakalářská práce se zabývá koncepcí svislých parních generátorů pro jaderné elektrárny III+ generace a tepelným výpočtem parního generátoru.. V první části je popsán primární okruh jaderné elektrárny a jeho uspořádání. Poté je pozornost věnována koncepcí parních generátorů a jaderných elektráren generace III+. V poslední části je na základě zadaných parametrů proveden tepelný výpočet parního generátoru, jehož výsledkem je velikost teplosměnné plochy a délky trubek.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

NEVŘELA, P. Vertical Steam Generators in Nuclear Power Plants. : Bachelor Thesis.

Ostrava : VŠB-Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering,

Department of Power Supply, 2010, 40 s. Thesis head: Kolat, P.

The bachelor thesis deals with conception of vertical steam generators for nuclear power plants III+ and thermal calculation of the steam generator. The first part describes the primary system of nuclear power plants and his layout. Then the main attention is given to the conception of steam generators and nuclear power plants III+. In the last part thermal calculation steam generator is implemented on base of defined parameters and its result is size of the heat transfer area and lengths of tubes.

Obsah

SEZNAM POUŽITÉHO OZNAČENÍ A ZKRATEK.....	7
1 ÚVOD.....	10
2 JADERNÉ ELEKTRÁRNY.....	11
2.1 PRIMÁRNÍHO OKRUHU JADERNÉ ELEKTRÁRNY	11
2.2 POPIS JEDNOTLIVÝCH ČÁSTI PRIMÁRNÍHO OKRUHU	13
3 PARNÍ GENERÁTORY	16
3.1 SVISLÉ PARNÍ GENERÁTORY	17
3.1.1 Parní generátor se svazkem U-trubek	17
3.1.2 Parní generátor s vyztuženou trubkovnicí.....	19
3.1.3 Průtočný parní generátor	19
4 JADERNÉ ELEKTRÁRNY III+ GENERACE.....	21
4.1 EPR	21
4.1.1 Parní generátor EPR.....	22
4.2 EP/AP 1000	26
4.2.1 PG AP 1000.....	26
4.3 APWR	27
4.3.1 PG APWR	28
5 TEPELNÝ VÝPOČET PARNÍHO GENERÁTORU.....	29
5.1 ZADANÉ PARAMETRY PARNÍHO GENERÁTORU.....	29
5.2 POČET TEPLOSMĚNNÝCH TRUBEK A CELKOVÁ PRŮTOČNÁ PLOCHA	30
5.3 SOUČINITEL PŘESTUPU TEPLA MEZI PRIMÁRNÍM MÉDIEM A STĚNOU TRUBKY	32
5.4 SOUČINITEL PŘESTUPU TEPLA MEZI STĚNOU TRUBKY A PAROVODNÍ SMĚSÍ	33
5.5 SOUČINITEL PROSTUPU TEPLA	34
5.6 VÝPOČET TEPLOSMĚNNÉ PLOCHY A STŘEDNÍ DÉLKY TRUBKY	37
5.7 PARNÍ A TEPELNÝ VÝKON PARNÍHO GENERÁTORU.....	38
6 ZÁVĚR.....	39
7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	40

SEZNAM POUŽITÉHO OZNAČENÍ A ZKRATEK

Značení	Název	Jednotka
G	vypočtený parní výkon parního generátoru	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$
G_{PG}	zadaný parní výkon parního generátoru	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$
L	celková délka trubek v parním generátoru	[m]
L_{tr}	střední délka trubky	[m]
Nu	Nusseltovo kritérium I. média při střední teplotě	[1]
Pr	Prandtlovo kritérium při střední teplotě I. média	[1]
Pr_{tr}	Prandtlovo kritérium při střední teplotě stěny trubky	[1]
Q_{JE}	tepelný výkon jaderné elektrárny	[MWt]
Q_{PG}	tepelný výkon parního generátoru	[MW]
Q_{PGv}	vypočtený tepelný výkon parního generátoru	[MW]
Re	Reynoldsovo kritérium I. média při střední teplotě	[1]
S	celková teoretické průtočná plocha	$[\text{m}^2]$
S_{C}	celková skutečná průtočná plocha	$[\text{m}^2]$
S_{t}	celková teplosměnná plocha	$[\text{m}^2]$
S_{tr}	průtočná plocha jedné trubky	$[\text{m}^2]$
d_1	vnitřní průměr trubky	[mm]
d_2	vnější průměr trubky	[mm]
i'	entalpie syté kapaliny	$[\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}]$
i''	entalpie syté páry	$[\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}]$
i_{I1}	entalpie I. média na vstupu	$[\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}]$
i_{I2}	entalpie I. média na výstupu	$[\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}]$
i_{nv}	entalpie napájecí vody	$[\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}]$
k	součinitel prostupu tepla	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$
lv	výparné teplo	$[\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}]$
m_1	hmotnostní tok I. média	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$
n	teoretický počet trubek	[1]
n_{sm}	počet smyček I. okruhu	[1]
n_{tr}	skutečný počet trubek	[1]
p_{I}	tlak v I. okruhu	[MPa]
p_{s}	tlak syté páry	[MPa]
q	střední tepelný tok stěnou trubky	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$

q_l	střední tepelný tok stěnou trubky (na délkový metr)	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}]$
q_v	střední tepelný tok stěnou trubky (teoretický)	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$
t_{I1}	teplota média v I. okruhu na vstupu	$[\text{°C}]$
t_{I2}	teplota média v I. okruhu na výstupu	$[\text{°C}]$
t_{NV}	teplota napájecí vody	$[\text{°C}]$
t_s	teplota syté páry	$[\text{°C}]$
$t_{stř}$	střední teplota I. média	$[\text{°C}]$
t_{trI}	povrchová teplota stěny trubky na straně I. média	$[\text{°C}]$
t_{trII}	povrchová teplota stěny trubky na straně II. média	$[\text{°C}]$
t_{trp}	teoretická střední teplota stěny trubky	$[\text{°C}]$
t_{trst}	střední teplota stěny trubky	$[\text{°C}]$
v	měrný objem	$[\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}]$
w	střední rychlost proudění I. média	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
w_v	střední rychlost proudění I. média	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
ΔG_{PG}	odklon skutečného parního výkonu parního generátoru od zadaného	$[\%]$
ΔQ_{PGrel}	odklon skutečného tepelného výkonu parního generátoru od zadaného	$[\%]$
Δq	relativní chyba volené hodnoty středního tepelného toku	$[\%]$
Δt_1	tepelný rozdíl mezi vstupujícím I. médiem a II. médiem	$[\text{°C}]$
Δt_2	tepelný rozdíl mezi vystupujícím I. médiem a II. médiem	$[\text{°C}]$
Δt_{ln}	střední logaritmický teplotní spád	$[\text{°C}]$
Δt_{trRel}	relativní chyba volené hodnoty střední teploty stěny trubky	$[\%]$
α_1	součinitel přestupu tepla mezi I.médiem a stěnou trubky	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$
α_2	součinitel přestupu tepla mezi stěnou trubky a parovodní směsí	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$
η	dynamická viskozita I.média při střední teplotě	$[\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}]$
η_{PG}	účinnost parního generátoru	$[\%]$
λ	součinitel tepelné vodivosti I.média při střední teplotě	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$

λ_{tr}	součinitel tepelné vodivosti teplosměnné trubky	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
ρ	hustota I.média při střední teplotě	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
ν	kinetická viskozita I.média při střední teplotě	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$

Zkratka	Název
ABWR	Advanced Boiling Water Reactor
AP1000	Advanced Pressurized Water Reactor 1000 MWe
APWR	Advanced Pressurized Water Reactor
BWR	Boiling Water Reactor
EES	Engineering Equation Solver
EP1000	European Pressurized Water Reactor 1000 MWe
EPR	European Pressurized Water Reactor
JE	jaderná elektrárna
KO	kompensátor objemu
MOX	(U,Pu)O ₂ Mixed – Oxide Fuel
PG	parní generátor
PWR	Pressurized Water Reactor
VVER	Vodo Vodjanyj Energetičeskij Reaktor

1 ÚVOD

Energie, která byla k dispozici člověku a kterou využívá se za necelé století zvýšila stokrát. Vzhledem k tomu, že se počet obyvatel ve světě zněkolikanásobil. V současné době se hovoří o fosilních energiích, které se vyčerpávají. Jedním z úkolů lidstva je hledání nových zdrojů energie, které by byly schopné nahradit zmenšující se zásoby fosilních paliv a které by byly šetrné k životnímu prostředí. V úvahu připadají obnovitelné zdroje. Obnovitelné zdroje, však mají nízkou účinnost a výskyt většinou jen lokální a také nemají vždy stoprocentní podmínky. Důležitým zdrojem energie, který připadá v úvahu a již dnes se už využívá je energie jaderná.

V současnosti pracuje ve světě více než 400 jaderných reaktorů, které vyrábějí 17% celkové produkce elektrické energie. V ČR asi 23%. Celková instalovaná kapacita ve světě se pohybuje kolem 370 000 GW. Ve francii, USA, Velké Británii, Japonsku a Rusku je provozováno nejvíce jaderných zdrojů. Nejčastěji používané typy reaktorů jsou tlakovodní reaktory (PWR, v ČR VVER). Dále se používají varné reaktory, plynem chlazené a další typy. Nejnovějšími reaktory jsou EPR a AP1000. Počet jaderných zařízení byl měl v budoucnosti růst. V souvislosti s plánováním nových projektů se mluví o reaktorech III, III+ a IV generace. V bakalářské práci popisují jaderné reaktory III+, které vycházejí již z existujících typů. Důležitou součástí jaderné elektrárny je parní generátor. Práce se zaměřuje konkrétně na svislé parní generátory.

Cílem bakalářské práce je popsat koncepci svislých parních generátorů pro jaderné elektrárny III+ generace a zjednodušený tepelný výpočet pro dvou smyčkové uspořádání primárního okruhu.

2 JADERNÉ ELEKTRÁRNY

Zařízení které přeměňuje energii vznikající při štěpné reakci v jaderném palivu v energii elektrickou. Je to vlastně parní elektrárna, u níž je topeniště parního kotle nahrazeno jaderným reaktorem, jehož získaná energie se používá k výrobě páry v parním generátoru. Tato vzniklá pára pohání turbínu, která pohání elektrický generátor.

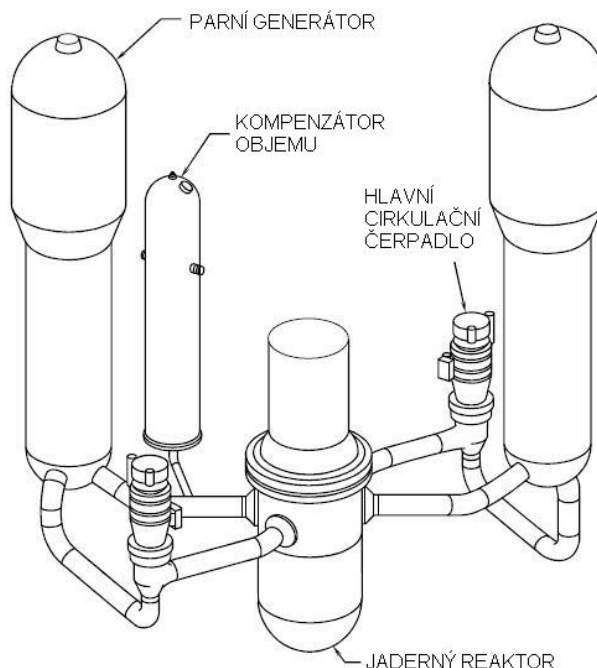
2.1 Primárního okruhu jaderné elektrárny

Slouží k přenosu tepelné energie z aktivní zóny do parního generátoru. Jedná se o uzavřený systém, který brání úniku radioaktivity vně tohoto systému. Primární okruh tvoří reaktor, parní generátor, hlavní cirkulační čerpadlo, kompenzátor objemu a potrubní systémy k cirkulaci vody.

Následující obrázky (Obr. 2.1, 2.2, 2.3, 2.4) zobrazují různé rozvržení primárního okruhu, od firem Westinghouse, Combustion Engineering a Babcock & Wilcox. Všechny se skládají ze stejných částí, které jsou jinak uspořádány. Westinghouse postavil elektrárny se dvěma, třemi a čtyřmi smyčkami v závislosti na výstupním výkonu elektrárny.

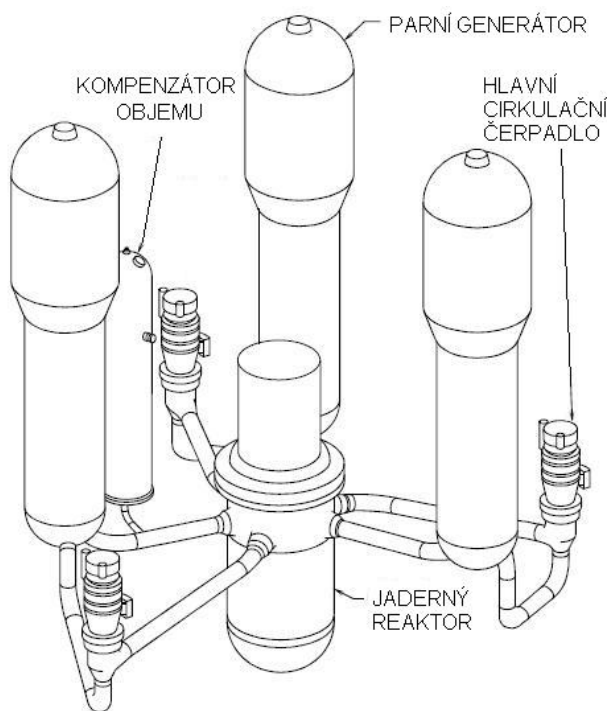
Dvousmyčkové uspořádání má dva parní generátory, dvě hlavní cirkulační čerpadla a kompenzátor objemu. Používá se u elektráren s elektrickým výkonem přibližně

500 MW.



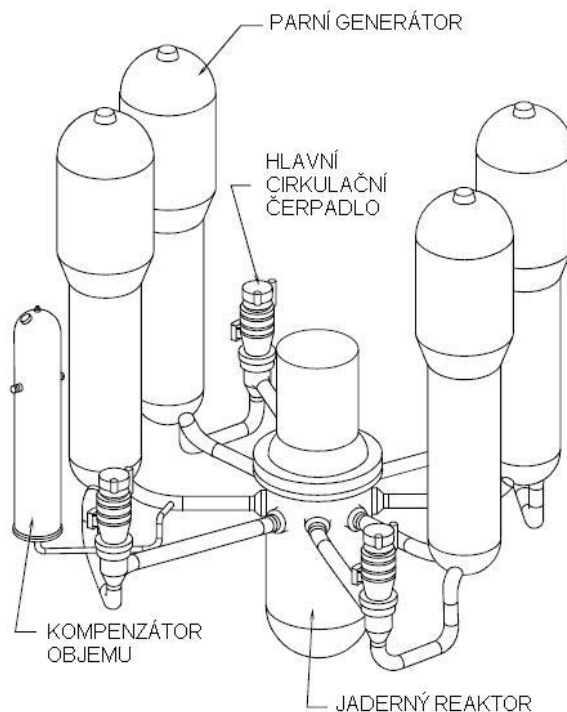
Obr. 2.1 dvousmyčkové uspořádání

Třísmyčkové uspořádání primárního okruhu obsahuje tři parní generátory, 3 hlavní cirkulační čerpadla a kompenzátor objemu. Elektrický výkon elektráren s tímto uspořádáním bývá od 700 MW do 900 MW.



Obr. 2.2 třímyčkové uspořádání

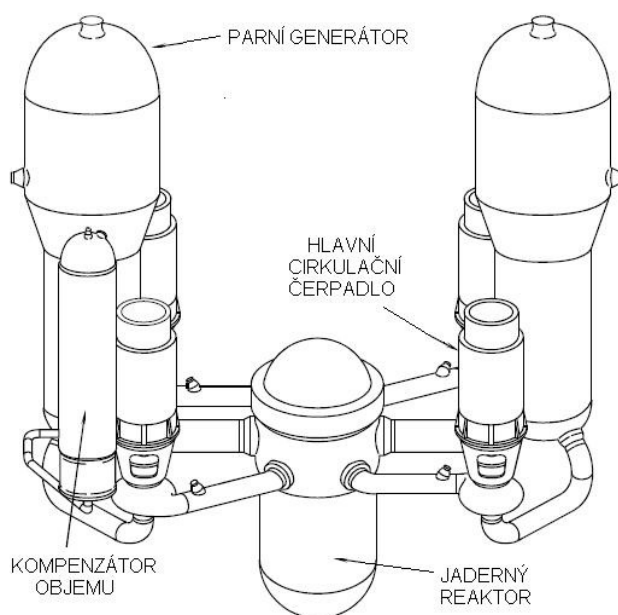
Čtyřsmýčkové uspořádání primárního okruhu má čtyři parní generátory, čtyři cirkulační čerpadla a kompenzátor objemu. Elektrický výkon je od 950MW až do 1250MW.



Obr. 2.3 čtyřsmýčkové uspořádání

Firmy Combustion Engineering a Babcock & Wilcox navrhují elektrárny s dvěma parními generátory, se čtyřmi hlavními cirkulačními čerpadly a s jedním kompenzátořem

objemu. Elektrický výkon těchto elektráren se liší. Zatímco od firmy Babcock & Wilcox je přibližně 850MW, tak od Combustion Engineering je 500MW až 1200MW.



Obr. 2.4 Primární okruh firem Combustion Engineering a Babcock & Wilcox

2.2 Popis jednotlivých částí primárního okruhu

Jaderný reaktor

V jaderném reaktoru dochází k uvolnění jaderné energie a její přeměně na energii tepelnou. Reaktor tvoří ocelová tlaková nádoba, uvnitř které se nachází aktivní zóna, v níž je uspořádáno jaderné palivo a regulační orgány pro řízení a kontrolu štěpné reakce.

Existuje mnoho konstrukčně rozdílných druhů reaktorů. Nejčastěji používaným typem je tlakovodní reaktor, též označován jako PWR (Pressurized Water Reaktor). Jako moderátor reakce a chladivo se používá voda. Palivem je obohacený uran ve formě oxidu uraničitého UO_2 . Druhým nejrozšířenějším reaktorem je varný reaktor BWR (Boiling Water Reaktor). Chladivem i moderátorem je voda. K varu dochází přímo v tlakové nádobě reaktoru. Mají vyšší účinnost ale nižší koeficient bezpečnosti.

Na Obr.2.5 vidíme přehled jednotlivých generací jaderných reaktorů, které jsou rozděleny zhruba následovně.

Generace I: první prototypy reaktorů, které ověřovaly možnosti energetického využití jádra. Dnes již nejsou v provozu.

Generace II: Jedná se o téměř všechny v současnosti pracující komerční elektrárny. Vycházely z koncepcí ověřených reaktorů I.generace. Elektrárny postavené a projektované jednotlivě.

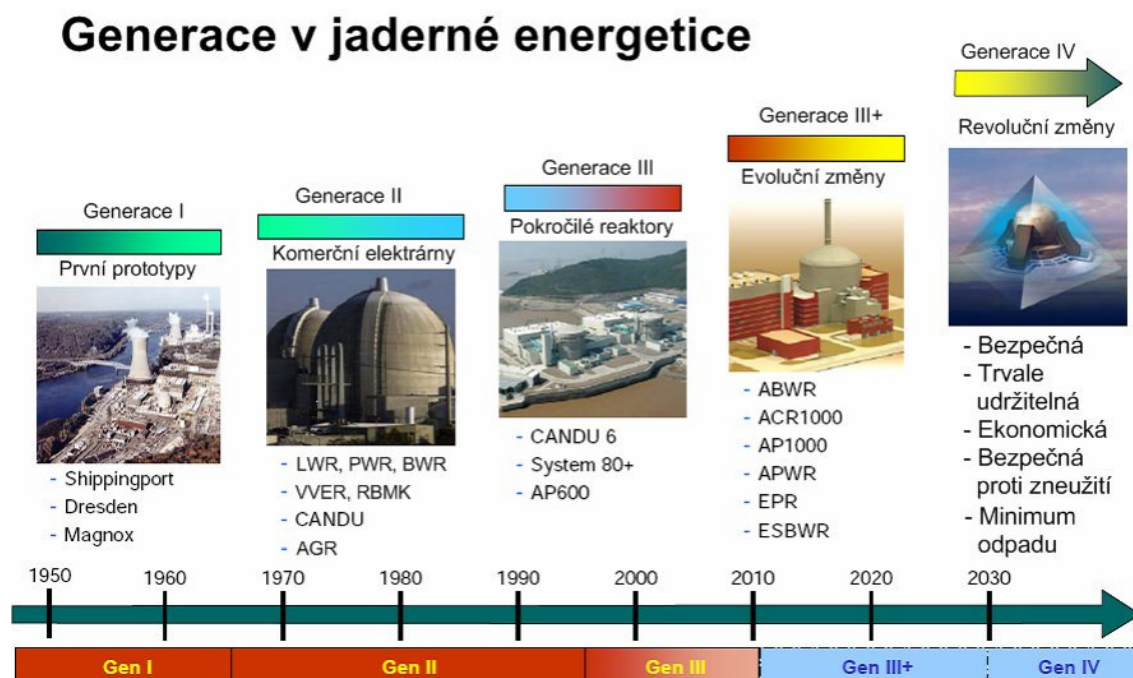
Generace III: Používají se od 90.let minulého století a nabízejí mnoho evolučních prvků, ať už z hlediska bezpečnosti tak ekonomiky. Mají lepší využití paliva, prodlužuje se doba mezi jeho výměnami a životnost elektrárny by měla dosáhnout 60 let.

Generace III+: Označují se tak reaktory s vylepšenými prvky pasivní bezpečnosti. V případě nestandardní situace se reaktor automaticky bez pomoci aktivních částí dostane do bezpečného stavu. Tyto reaktory by měly tvořit základ jaderné energetiky v příštích desetiletích.

Rozdělení reaktorů v rámci třetí generace nemá úplně pevnou hranici. Pokročilý lehkovodní varný reaktor typu ABWR (Advanced Boiling Water Reactor), který začal pracovat v elektrárně Kashiwazaki-Kariwa v Japonsku, je na rozhraní mezi generací III a III+. V této elektrárně jsou dva reaktory tohoto typu. Další reaktory tohoto typu se staví v Japonsku a dva na Tchaj-wanu.

V Evropské Unii se staví dvě zařízení, která už patří ke generaci III+. Prvním je třetí reaktor finské elektrárny Olkiluoto. Druhým je třetí blok jaderné elektrárny Flamanville ve Francii. Jak ve Finsku tak ve Francii se jedná o reaktor typu EPR (European Pressurised water Reaktor).

Generace IV: Jedním z požadavků u těchto reaktorů je zvyšování účinnosti a výroba vodíků, který by měl nahradit nyní ropné produkty. Prioritou je bezpečnost. Dalším kritériem je ekonomika provozu jaderné elektrárny a jejich konkurenceschopnost s ostatními zdroji.



Obr. 1.5 přehled jednotlivých generací jaderných reaktorů [8]

Parní generátor

Tepelný výměník, ve kterém voda z reaktoru předává svojí tepelnou energii vodě sekundárního okruhu. V okruhu sekundárním je tlak nižší než v primárním, čímž vzniká pára, která slouží k pohonu turbíny.

Kompenzátor objemu

Plní funkci regulátoru tlaku a objemu kapalného chladiva. Pracuje jako vyrovnávací nádrž, doplňující nebo odebírající kapalně chladivo z primárního okruhu při změnách jeho objemu vlivem tepelných dilatací chladiva. Vyrovnávání tlaku v kompenzátoru objemu je prováděno pomocí parního polštáře nad vodní hladinou. Kompenzátor objemu (dále už jen „KO“) má dva prostory a to vodní a parní. Vodní prostor je trvale spojen s částí horké větve jedné ze smyček primárního okruhu. Při poklesu tlaku v KO se zapínají elektroohříváky, čímž nastává vývin páry a tlak stoupá. Dojde-li k zvýšení tlaku, otevře se regulační ventil a tryskami se rozprašuje studená voda do parního prostoru KO, čímž dochází ke kondenzaci páry a poklesu páry.

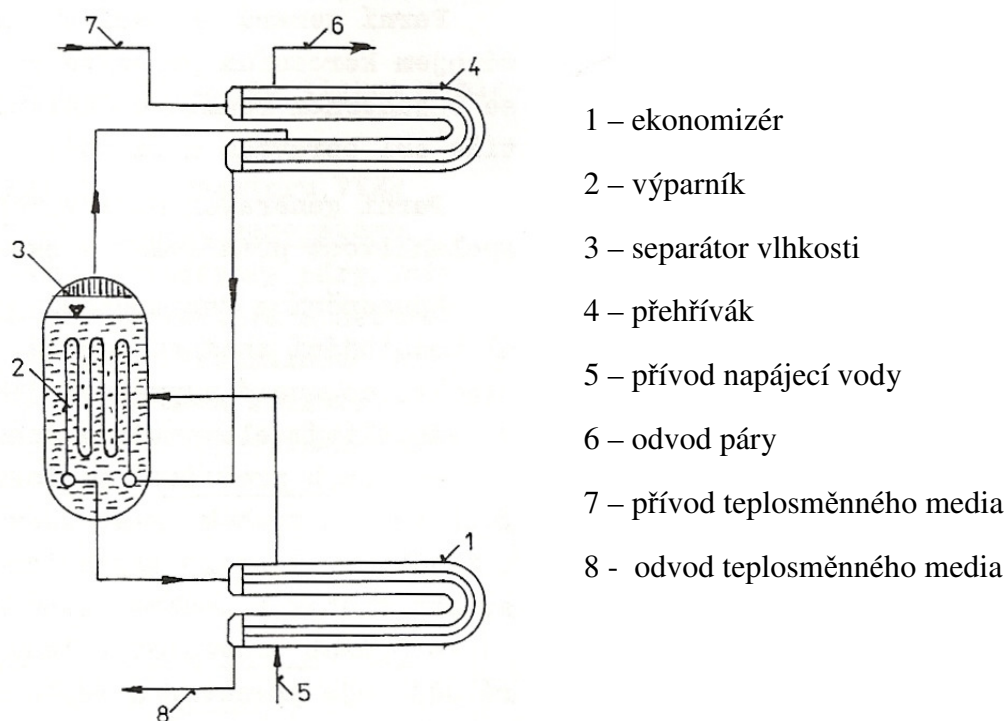
Hlavní cirkulační čerpadlo

Dopravuje chladivo z parního generátoru do reaktoru. Kvůli vysokému tlaku, teploty a radioaktivitě vody jsou technologicky nejnáročnější čerpadla v jaderné elektrárně.

3 PARNÍ GENERÁTORY

Parní generátor (dále jen „PG“) je zařízení k výrobě páry, pomocí tepla předávaného vodě a páře teplotnějším médiem ochlazujícím jaderný reaktor. Odděluje aktivní primární okruh od neaktivního sekundárního okruhu. Charakteristické údaje parního generátoru jsou : tepelný a parní výkon, vstupná, výstupní teplota a tlak primárního média, tlak a teplota sekundárního média a čistota páry.

Obecně se parní generátor skládá z dohřívací části (ekonomizér), výparníkové části (výparník), separátoru páry a přehřívací části (Obr 3.1). Tyto části můžou být soustředěny v jednom tělese, nebo být rozděleny na samostatné tepelné aparáty umístěné za sebou, nebo vedle sebe do okruhu primárního teplotnějšeho média. Proudění primárního teplotnějšeho média parním generátorem je za normálních provozních podmínek nucené.



Obr. 2.1 hlavní součásti parního generátoru

Konstrukce PG musí vyhovovat následujícím požadavkům a kritériím:

- Požadována životnost parního generátoru je 30 až 35 let.
- Spoje musí být těsné, aby zabránili proniknutí radioaktivního teplotnějšeho média do pracovní látky a naopak.
- PG by měly být jednoduché a kompaktní, dovolující snadnou montáž, likvidaci havárie a ekonomickou opravu teplosměnné plochy, dokonalé vypuštění jeho primární i sekundární strany, dostatečný přístup k jednotlivým elementům a snadný bezporuchový provoz.

- Zajistit projektovaný výkon, parametry páry a bezpečný provoz při různých režimech jaderné elektrárny.
- Všechny části musí mít vysokou bezpečnost a spolehlivost

Konstrukčních řešení parního generátoru je několik. Závisí na typu reaktoru a tedy i na parametrech primárního a sekundárního média a na požadovaném tepelném výkonu. Hlavní typy PG jsou horizontální (vodorovný) a vertikální (svislý).

Cílem bakalářské práce je koncepce svislých parních generátorů, proto se budu zabývat svislými parními generátory.

3.1 Svislé parní generátory

Svislé (vertikální) parní generátory se vyrábějí zejména v USA a západní Evropě. Výhodou je menší zastavěná půdorysná plocha a proto menší těleso kontejnmentu.

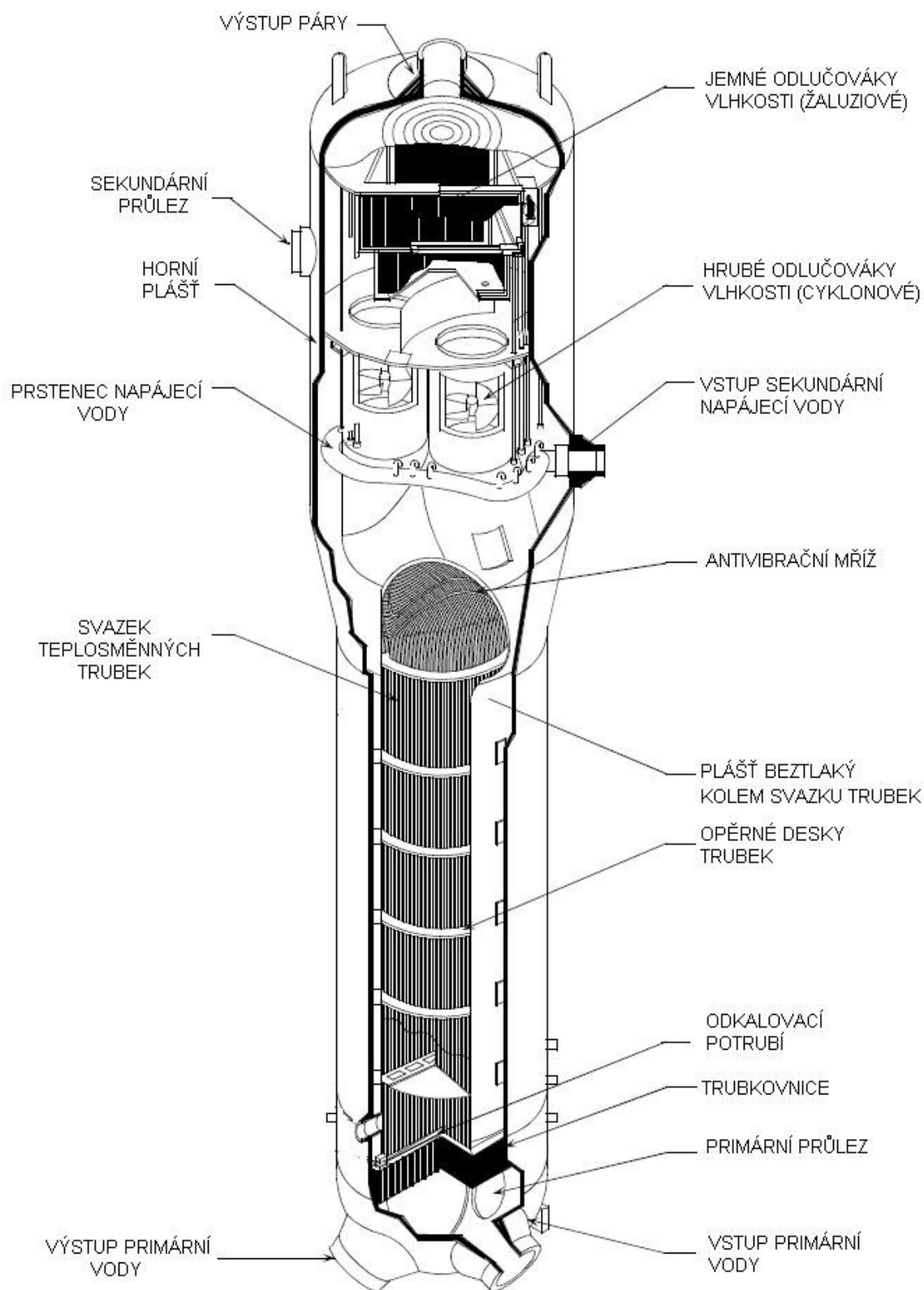
V následujících bodech se zaměřím na svislé parní generátory vyráběné firmami Westinghouse, Combustion Engineering a Babcock & Wilcox. Konstrukčně se dělí na parní generátor se svazkem U-trubek, s vyztuženou trubkovnicí a průtočný.

3.1.1 Parní generátor se svazkem U-trubek

Primární voda proudí uvnitř trubek a sekundární voda a pára v mezitrubkovém prostoru, čili v tělese PG. U-trubky musí být z nerezových ocelí nebo vysoce z legovaných nikl-chromových slitin. Většinou se pro svislé PG používá vysoce legovaných slitin jako je Incoloy 800, Inconel 600 nebo Inconel 690. Je snaha používat bezešvých trubek z jednoho kusu, které spojují s trubkami nebo s kolektory zaválcováním a obvařením.

Na sekundární straně PG, tedy v mezitrubkovém prostoru na vnějším povrchu teplosměnných trubek, dochází k varu vody, která se mění částečně v páru a stoupá tak přirozeným oběhem vzhůru. Celý svazek trubek je ponořen pod hladinu sekundární vody, která je již v horní rozšířené části parního generátoru. Parovodní směs vstupuje do separačního prostoru, který je nad svazkem teplosměnných trubek, ve tvaru válce se svislou osou.

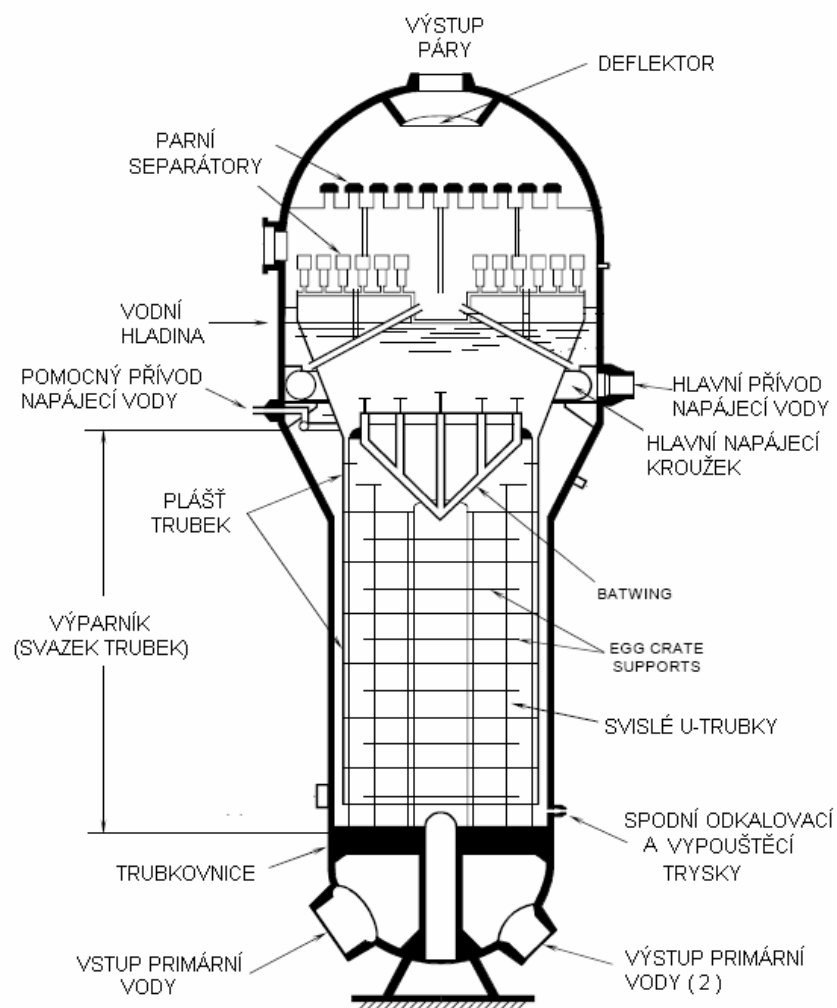
V návrhu Westinghouse (Obr.3.2) a Combustion Engineering (Obr.3.3), parovodní směs prochází vícenásobnými stupni separátorů. První stupeň separace je tvořen cyklónovými separátory a plní funkci tzv.hrubé separace. Fungují na odstředivém principu a k odloučení vody z parovodní směsi využívají jejich rozdílnou měrnou hmotnost. Ve druhém stupni jsou použity žaluziové separátory a plní funkci tzv.jemné separace. Mokrá pára jím protéká, stále mírně mění směr a při těchto změnách směru se z ní odlučuje voda. Dvoustupňový proces odstranění vlhkosti páry je tak účinný při odstranění vody, že vlhkost páry je menší než 0,25%. Je důležité udržovat obsah vlhkosti páry tak nízko, aby nedošlo k poškození lopatek turbíny.



Obr. 3.2 svislý parní generátor se svazkem U-trubek

3.1.2 Parní generátor s vyztuženou trubkovnicí

Americká firma Combustion Engineering vyztužila zespodu trubkovnici masivním stojanem, aby snížila potřebnou tloušťku trubkovnice. Tento parní generátor má u své výstupní části svazku trubek integrálně zařazené ekonomizéry. Napájecí voda je přiváděna dole hrdly. Jsou zde dva ohříváky, pro levou a pravou polovinu svazku trubek. Přirozená cirkulace sekundární vody je podobná, jako byla popsána v kap.3.1.1. Narozdíl od parního generátoru firmy Westinghouse má tento, dva výstupy primární vody. [1]



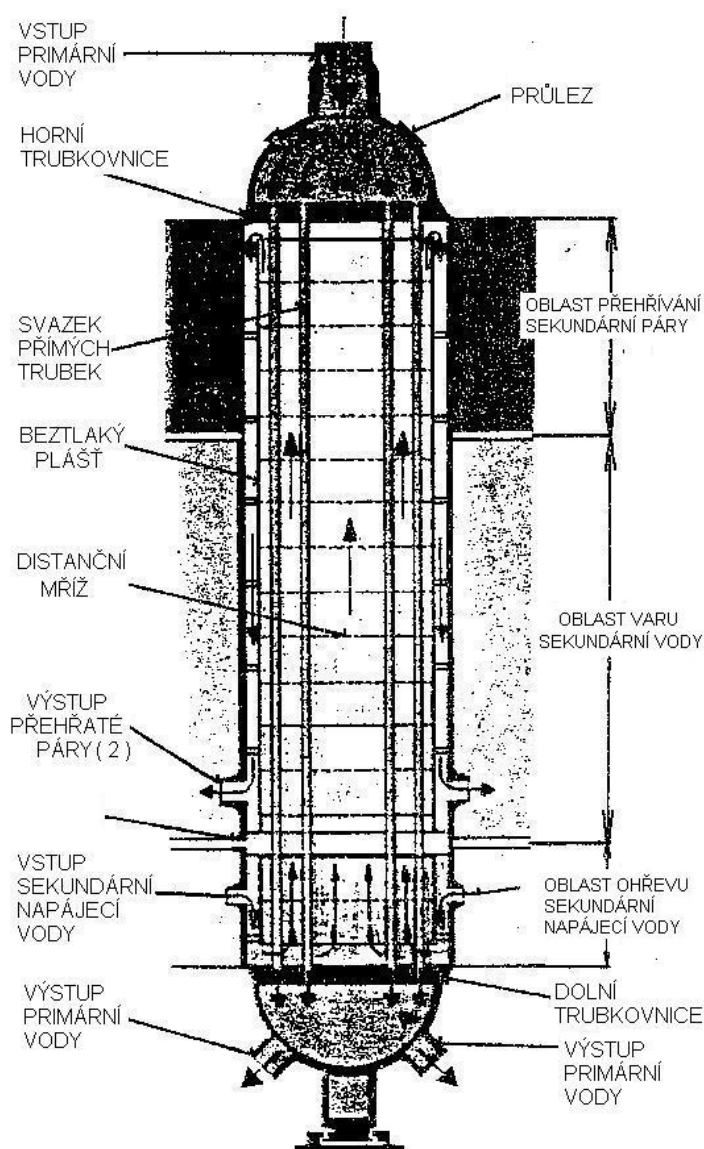
Obr.3.3 PG s vyztuženou trubkovnicí

3.1.3 Průtočný parní generátor

Svislý parní generátor s přímými trubkami s mírným přehříváním páry od firmy Babcock & Wilcox (Obr 3.4). Průtočný se nazývá proto, že průtok sekundární vody a páry parním generátorem je nucený a vyvozený napájecím čerpadlem. U tohoto návrhu bylo možno vypustit celou horní rozšířenou část, obsahující separátory vlhkosti, díky přehřívání nasycené páry. Primární voda vstupuje do vstupní komory primární vody, jejíž dno tvoří horní trubkovnice. Do otvorů trubkovnice jsou přivařeny přímé trubky, které tvoří

teplosměnnou plochu parního generátoru. Primární voda proudí trubkami shora dolů do spodní výstupní komory, z níž vystupuje z parního generátoru dvěma potrubími.

Sekundární napájecí voda vstupuje přes nátrubky a proudí dolů mezikruhovým prostorem. Mezikruhový prostor je mezi tělesem PG a beztlakovým pláštěm, obalujícím svazek trubek. Jelikož plášť nedosahuje k dolní trubkovnici a také k horní trubkovnici, vznikají dvě mezery. První (dolní) mezerou protéká napájecí voda do prostoru mezi trubkami ve svazku a její proud směřuje vzhůru. V dolní části svazku trubek se voda ohřeje na bod varu, v další části se změní v nasycenou páru, která se při průtoku poslední části přehřeje. Druhou (horní) mezerou proudí přehřátá pára do prostoru mezi tělesem parního generátoru a pláštěm a pak dolů. Cestou dolů ohřívá těleso parního generátoru, načež vystupuje nátrubky z parního generátoru. Vedení a distancování trubek ve svazku je provedeno distančními mřížemi. [2]



Obr. 3.4 průřezový parní generátor [1]

4 JADERNÉ ELEKTRÁRNY III+ GENERACE

Jaderné elektrárny používající reaktory III+ generace, jejichž bezpečnost je opřena o základní fyzikální principy, vylučující možnost havárie (tzv. inherentní bezpečnost), a o vylepšené prvky pasivní bezpečnosti, které by i při nesmírně nízké pravděpodobnosti nehody zabránily úniku nebezpečných látek mimo prostor reaktoru a kontejnmentu.

Inherentní bezpečností je myšleno uspořádání aktivní zóny, která po fyzikální stránce vykazuje za všech okolností záporný koeficient reaktivity. Inherentně bezpečným se dnes označuje takový systém, který je netečný vůči lidským chybám nebo úmyslným zásahům i proti vnějším vlivům. [6]

Pasivní bezpečností se rozumí použití takových systémů regulace výkonu, chlazení aktivní zóny a jejího havarijního dochlazování, které budou fungovat i v případě výpadku dodávky proudu pro čerpadla, regulační ventily a jiné komponenty, což by mohlo nastat jen při současném selhání několika zdrojů energie, které mají dnešní jaderné elektrárny v záloze. Příkladem jsou tyče havarijní ochrany, které v případě selhání elektrického systému uvolnění a pohonu spadnou do aktivní zóny působením zemské tíže.[6]

Koncepci těchto reaktorů se zvýšenou bezpečností, popíšu konkrétně na příkladu zdokonaleného evropského tlakovodního EPR, na reaktoru AP-1000 a na APWR. Dále charakterizují parní generátory používané u těchto reaktorů.

Společným znakem jejich inherentního principu a kombinace aktivní a pasivní bezpečnosti je i výrazné snížení počtu komponentů u reaktoru, parogenerátorů i ve strojovnách, což sníží investice do stavby i technologie. Zrychlí jejich výstavbu, zjednoduší provoz a údržbu a zvýší spolehlivost bloku. Většina z nich bude plněna až z třetiny novou formou paliva MOX (tablety ze směsi oxidů uranu a plutonia), které umožní využít nadbytečné zásoby plutonia, a protože jde o vodou nerozpustný a nezničitelný keramický materiál, sníží se tím dále nebezpečí úniku štěpných produktů do chladicích okruhů.

4.1 EPR

Jedná se o jeden z nejvýkonnějších tlakovodních reaktorů, který kombinuje přednosti posledního modelu německého reaktoru KONVOI a francouzského reaktoru N4. Očekává se, že bude dodávat energií o 10% levněji než N4. Udávaný výkon je 1500 až 1750 MWe a účinnost reaktoru dosahuje až 37%. Reaktor by měl být chopen využívat palivo MOX obsahující plutonium z přepracovaného vyhořelého paliva.. Primární okruh se skládá se čtyř smyček (Obr. 4.1).

Hlavní součástí reaktorů EPR patří tlaková reaktorová nádoba, parní generátor (Obr.4.2), cirkulační čerpadlo. Zvětšení těchto součástí oproti předchozího návrhu, vedlo k zvýšení výkonu, bezpečnosti a operativnosti. Celý blok je rozdělen do čtyř fyzicky

oddělených části, obklopující ze všech stran dvouplášťový betonový kontejnment. Vnitřní plášť je odolný proti přetlaku v případě exploze primárního okruhu. Vnější železobetonový plášť je schopný odolat nárazu letadla. Pravděpodobnost havárie, kde by se poškodila aktivní zóna je menší než 10^{-7} za rok. Životnost elektrárny je projektována na 60 let bez výměny reaktorové nádoby. Ostatní komponenty jsou projektovány tak, aby byla možná jejich výměna.

EPR jednotky jsou např. vybudovány v Olkilinto ve Finsku a na Flamanville ve Francii.



Obr. 4.1 schéma I. okruhu s havarijními systémy EPR III+ [9]

4.1.1 Parní generátor EPR

Konstrukce parního generátoru v EPR je založena na parním generátoru používaném v elektrárně N4. Je to svislý parní generátor se svazkem U-trubek a s axiálním ekonomizérem (Obr 4.3). Skládá se ze dvou částí. Jedna zajišťuje odpařování napájecí vody. Ve druhé probíhá mechanické sušení vyrobené parovodní směsí. Je uspořádán vertikálně, směs vody a páry proudí směrem nahoru přirozenou cirkulací. Napájecí voda vstupuje do parogenerátoru přes hlavní trysky napájecí vody do kuželového obalu s cílem redukovat tepelné rozvrstvení. Pak vede přes distribuční půlkruh (strana studené větve) vybavený plochým deflektorem instalovaným v úrovni nad horní části trubkového svazku.

Princip fungování axiálního ekonomizéru je nasměrovat napájecí vodu k studené větvi trubkového svazku a asi 90% z recyklované vody do horké větve. To je v praxi zajištěno začleněním následujících rysů do konstrukce PG se svazkem U-trubek se standardní přirozenou cirkulací :

- Dvojitým obalem spádové trubky na studené straně, ve které proudí napájecí voda na stranu k studeným větvím svazku trubky.
- Oddělením studené větve od horkých větví v části trubkového svazku deskou.

Tento návrh zvyšuje účinnost, tepelné výměny mezi primární a sekundární stranou a zvyšuje tlak vyrobené páry o 3 bary ve srovnání se standardními PG, které mají stejnou teplosměnnou plochu.

Parní generátor je celý postaven v továrně a je transportován na místo a nainstalovaný v budově reaktoru.



Obr. 4.2 svislý parní generátor EPR III+

Spodní část PG

Skládá se z následujících částí:

- Kanálová hlava tvořená hemisferickou spodní hlavou a trubkovnicemi. Válcové sekce byly přidány k horní části dolní hlavy, aby zlepšily přístup k periferním trubkám pro nahlédnutí. Primární rozdělovací deska dělí kanálovou hlavu na dva těsné prostory. Jeden je připojený k výstupu z reaktorové nádoby (horká větev) a druhý k vstupu z reaktorové nádoby (studená větev).
- Každý úsek obsahuje trysku pro spojení s reaktorovou chladicí soustavou a lezným oddělením, které poskytuje přístup pro kontrolu a operace údržby. Specifická opatření jsou zhotovena k tomu, aby dovolila uzavírat trysky, provádět inspekci a údržbu uvnitř každého úseku během odstavení.

- Spodní část sekundárního obalu parního generátoru se skládá ze tří válcových plášťů. Spodní sekce je vybavená 8 ručními dírami po kontrolu během provozu a operace na údržbě spodních částech trubkového svazku. Prostřední část je vybavená dvěma diametrálně opačnými hledítky ve dveřích. Odkalování z parního generátoru je prováděno prostřednictvím tří odkalovacích kohoutků umístěných v trubkovnicích.
- Trubkový svazek, vytvořený z U-trubek, poskytuje tepelnou výměnu mezi primárním chladivem, které obíhá uvnitř trubek a sekundárním chladicím zařízením. Představuje také radiologickou překážku mezi primární a sekundární stranou nukleárního systému zásobovaný párou. Trubkový svazek je uspořádaný v trojúhelníkovém tvaru. Konce U-trubek jsou přivařeny k ochranné obvodové konstrukci primární plochy trubkovnic.

Úlohou spodních vnitřních opěrných konstrukcí je podporovat trubkový svazek při zajištění oběhu sekundární chladicí kapaliny.

Obal svazku, který izoluje recirkulaci vodního toku od parovodní směsi, vytváří kruhovou zónu mezi trubkovým svazkem a obalem parogenerátoru. Vytvořenou kruhovou zónu nazýváme spádová trubka. Prstencové (kruhové) otvory ve spodní části dovolují distribuci vody do trubkového svazku.

Poloprstencovou spádovou trubku na straně studených větví zahrnuje dvojitý obal koncentrický s obalem svazku. Výstup je blízko horní plochy trubkovnic na obvodu trubkového svazku na straně studené větve.

Oddělovací sekundární deska, svařená k obalu svazku trubek, odděluje stranu studené větve a stranu horkých větví a představuje tak ekonomizér. Spoj mezi oddělovací deskou a trubkovnicemi je těsný.

Horní část PG

Horní část (parní válec) je zhotovený ze dvou válcových stěn, kuželového pláště a eliptického horního konce. Válcová sekce je vybavená:

- Dvěma leznými odděleními poskytující přístup k separátoru, k zařízením napájecí vody.

Střed horní eliptické hlavy obsahuje integrální trysku na vývod páry vybavena omezovačem průtoku páry. Omezuje poměr poklesu tlaku a sil působících na svazek trubek parního generátoru.

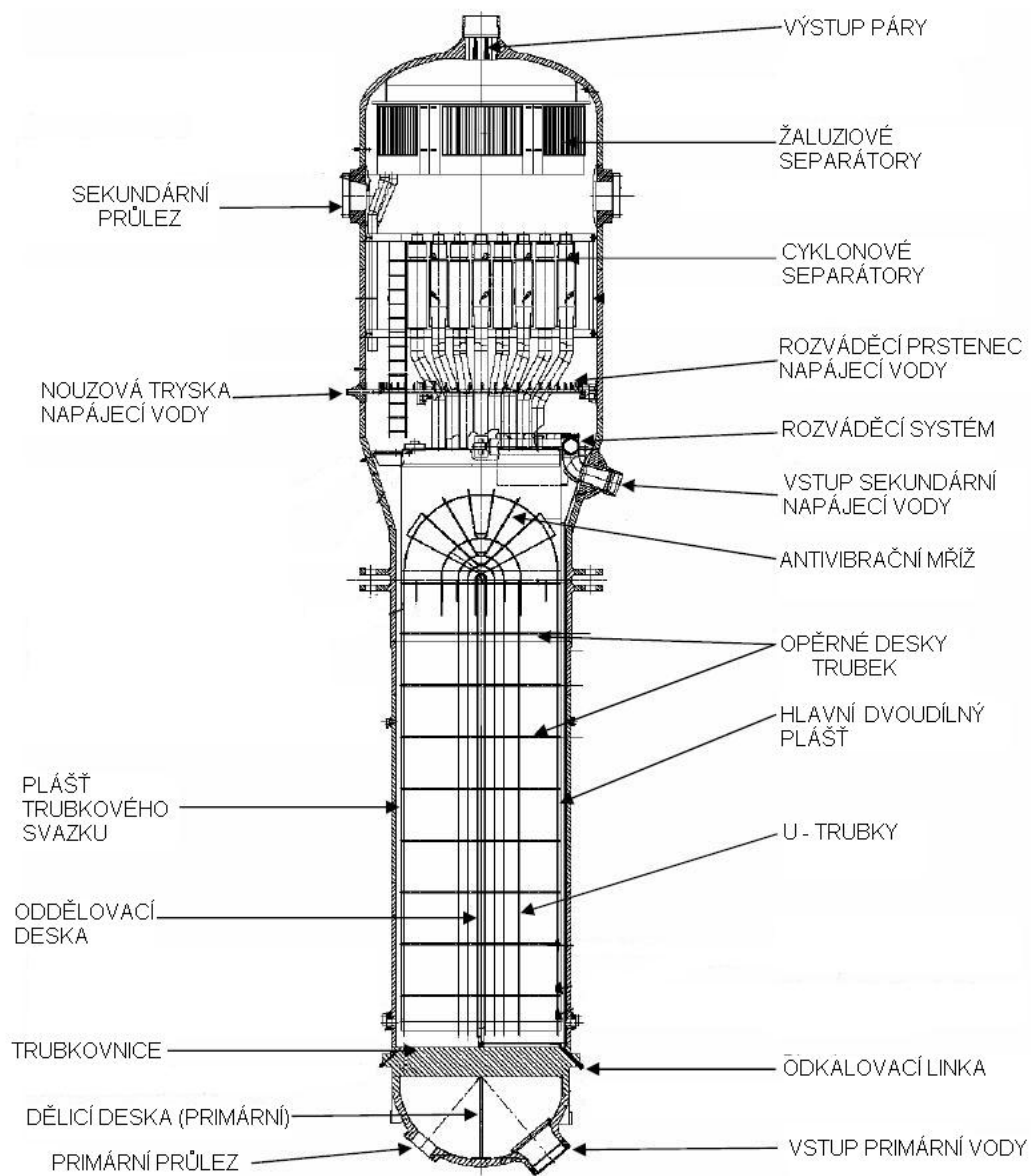
Parní válec je vybaven hlavním systémem napájecí vody, který obsahuje:

- Hlavní trysku napájecí vody umístěnou v kuželovém plášti, tepelný nátrubek a půlkruh napájecí vody vybaveného odklápací plochou, aby zajistila

rovnoměrné rozdělení veškeré vody z hlavního systému napájecí vody a vypnutí systému.

Parní generátor je navržený tak, aby vlhkost páry byla menší než 0,25% a aby byla možnost nepřetržitého odkalování sekundární strany.

Materiál trubek je slitina 690, která má vynikající odolnost proti korozi.



Obr.4.3 parní generátor EPR [7]

4.2 EP/AP 1000

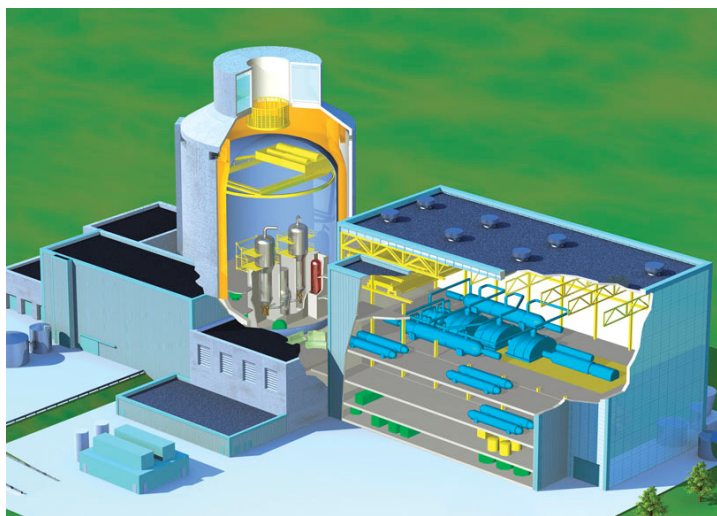
Tlakovodní reaktor s výkonem 1154 MWe a se zvýšenou pasivní a inherentní bezpečností firmy Westinghouse. Dvousmyšková AP 1000 a třismyčková EP 1000 čerpá z bohatých zkušeností této firmy a navazuje na úspěšnou konstrukci.

Vylepšené nouzové systémy chlazení a ochranná obálka mají být automatizovány tak, že po havárii nebude vyžadovat v prvních třech dnech zásah personálu.

Další změna se týká chlazení vnějšího povrchu ocelové ochranné obálky přirozenou konvekcí vzduchu. Díky tomu nemusí být ochranná obálka vybavena pojistným ventilem napájeným na filtrační systémy.

Podařilo se také snížit počet čerpadel, nádrží, výměníků, potrubí a ventilů. V případě havárie aktivní zóny nebo poškození tlakového okruhu parogenerátorů dokáží tepelné výměníky pasivního systému v každé smyčce bezpečně odvádět teplo přirozenou cirkulací.

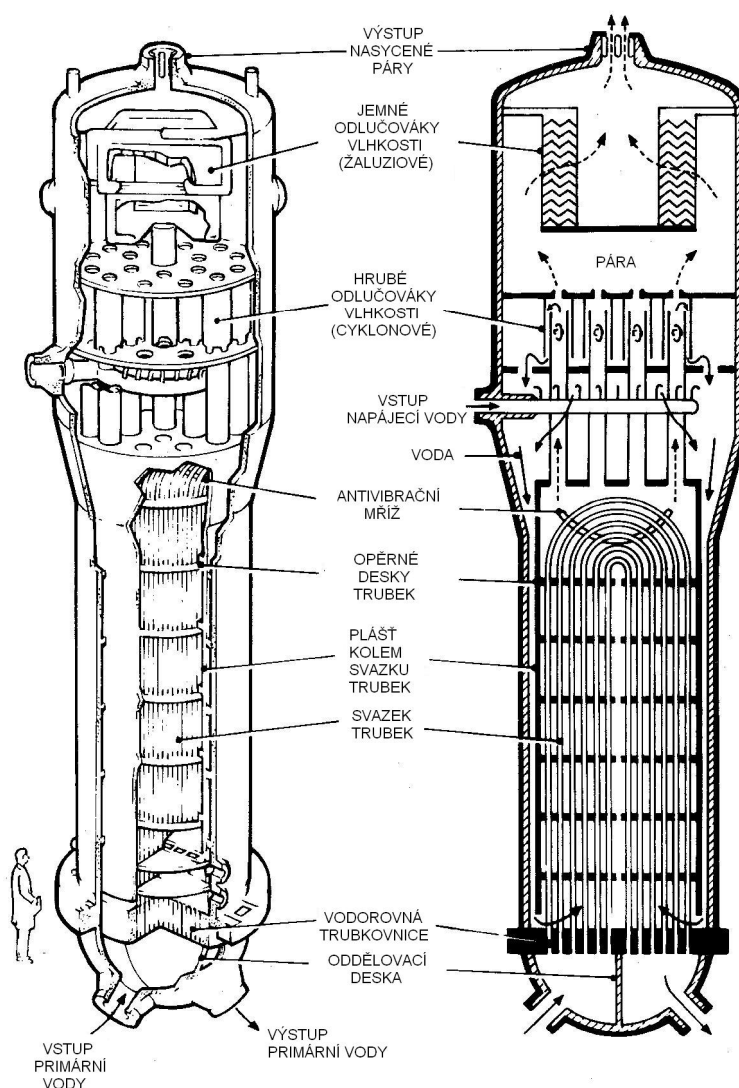
EP 1000 je navržen pro potřebu evropského trhu. Má větší průměr reaktorové nádoby než AP 1000 a vyšší redundance bezpečnostních systémů.



Obr. 4.4 AP 1000 [8]

4.2.1 PG AP 1000

Parní generátor firmy Westinghouse je navržen na základě předcházejících modelů této firmy. Obsahuje zdokonalené primární a sekundární odlučovače páry, které zajišťují že pára na výstupu má menší vlhkost než 0,2%. Zvětšené průlezy počítají se snadným přístupem a údržbou. Za účelem zlepšení spolehlivosti jsou instalované antivibrační mříže na U-trubách. Trubky jsou z nikl-chromové slitiny 690. Princip fungování PG je popsán v kap.3.1.1.

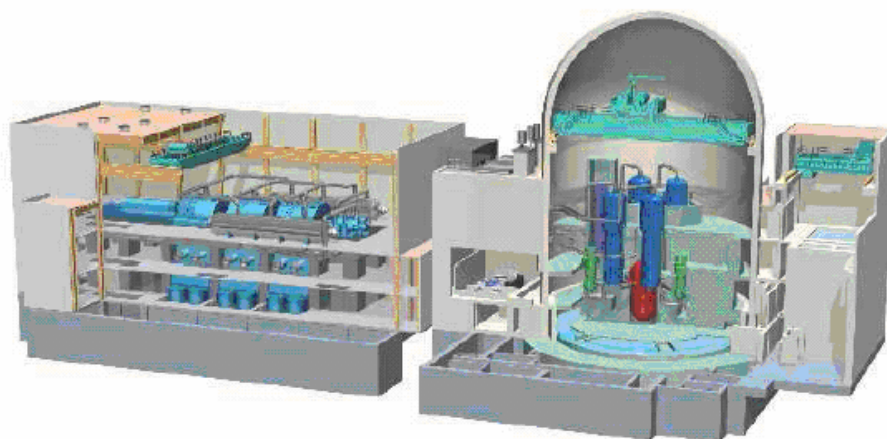


Obr. 4.5 parní generátor AP 1000 [2]

4.3 APWR

Japonská firma Mitsubishi se spolupráci s Westinghouse hodlá od roku 2010 stavět pokročilé tlakovodní reaktory APWR s elektrickým výkonem 1700MWe. Se stavbou jejího prototypu začali v jaderné elektrárně Tsurunga. V této elektrárně má reaktor výkon 1538MWe a jedná se o čtyřsmýčkové uspořádání primárního okruhu. Kombinuje účinné a pasivní chladicí systémy s vyšší účinností. Pro potřeby amerického trhu byl reaktor upraven a přejmenován na US-APWR.

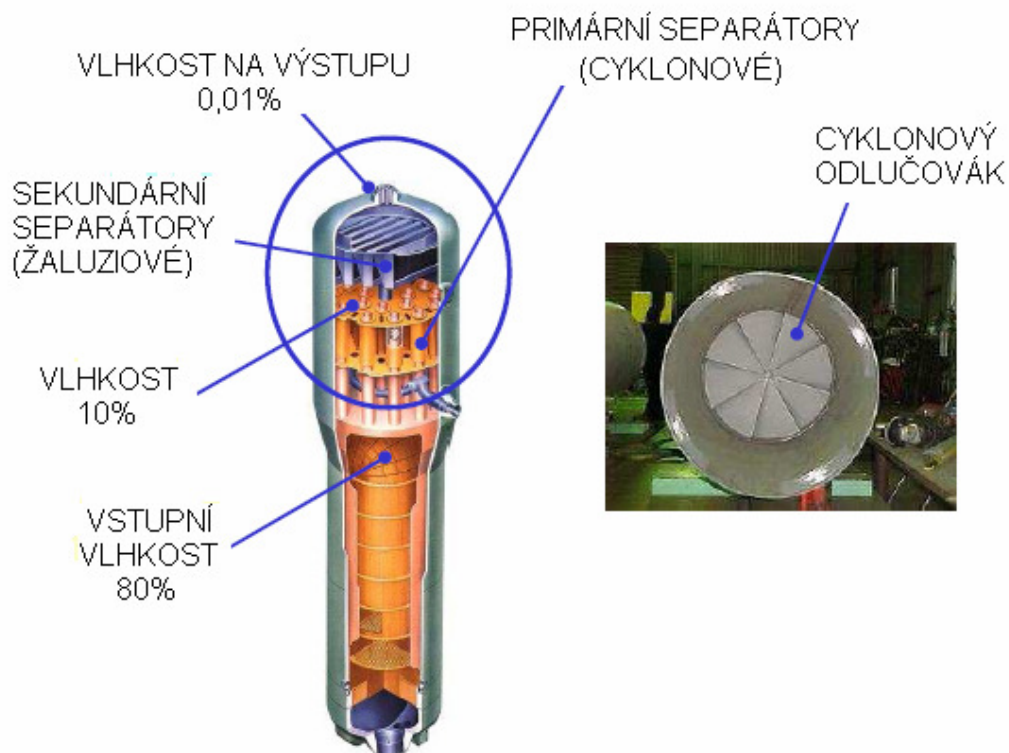
US-APWR (Obr. 4.6) bude mít výkon 1700 MWe, z důvodu delších palivových souborů je účinnost reaktoru 39%. Primární okruh bude čtyřsmýčkový a reaktor by měl být chopen využívat palivo MOX.



Obr. 4.6. JE s US-APWR [10]

4.3.1 PG APWR

Oproti PG používaný v JE Tsurunga má PG (Obr. 4.7) pro US-APWR větší teplosměnnou plochu, lepší separátor vlhkosti, menší hmotnost asi o 10% kvůli zmenšení výšky a průměr trubek byl snížen z 22 mm na 19 mm. Jde o parní generátor se svazkem U-trubek, jehož princip jsem nastínil v kap.3.1.1.



Obr. 4.7 PG se zlepšenou vlhkostí [10]

5 TEPELNÝ VÝPOČET PARNÍHO GENERÁTORU

Tepelný výpočet parního generátoru obsahuje širokou a různorodou problematiku.. Hlavním úkolem je výpočet celkové tepelné bilance výměníku. Výpočet byl proveden na základě zdrojů [3]. Tabelované hodnoty (tepelné charakteristiky a entalpie) jsou získány prostřednictvím programu EES.

5.1 Zadané parametry parního generátoru

Tepelný výkon jaderné elektrárny	$Q_{JE} = 3415$	[MWt]
Parní výkon parního generátoru	$G_{PG} = 963,9$	[kg·s ⁻¹]
Tlak syté páry	$p_s = 7,8$	[MPa]
Tlak v I. okruhu	$p_I = 16,2$	[MPa]
Teplota média v I. okruhu na vstupu	$t_{I1} = 330,7$	[°C]
Teplota média v I. okruhu na výstupu	$t_{I2} = 298,5$	[°C]

Tepelný výkon parního generátoru

$$Q_{PG} = \frac{Q_{JE}}{n_{sm}} \quad [MW_t] \quad (5.1)$$

$$Q_{PG} = \frac{3415}{2} = 1707,5 \quad [MW_t]$$

kde n_{sm} [1] - počet smyček primárního okruhu , $n_{sm} = 2$ [1]

Střední teplota primárního média

Tato teplota je nutná k určení tepelných charakteristik a je důležitou součástí při výpočtu přestupu tepla mezi primárním médiem a teplosměnnou trubkou.

$$t_{stř} = \frac{t_{I1} + t_{I2}}{2} \quad [°C] \quad (5.2)$$

$$t_{stř} = \frac{330,7 + 298,5}{2} = 314,6 \quad [°C]$$

Charakteristiky primárního média při jeho střední teplotě a tlaku 15,7 MPa

Hustota	$\rho = 695,9$	$[kg \cdot m^{-3}]$
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 51,79 \cdot 10^{-2}$	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
Měrný objem	$v = 0,001437$	$[m^3 \cdot kg^{-1}]$
Dynamická viskozita	$\eta = 8,308 \cdot 10^{-5}$	$[N \cdot s \cdot m^{-2}]$
Kinetická viskozita	$\nu = 0,119 \cdot 10^{-6}$	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
Prandtlovo kritérium	$Pr = 0,9407$	$[1]$

Entalpie primárního média

$$\text{Entalpie primárního média – vstup } i_{11} = 1519 [kJ \cdot kg^{-1}]$$

$$\text{Entalpie primárního média – výstup } i_{12} = 1328 [kJ \cdot kg^{-1}]$$

Entalpie sekundárního média

$$\text{Entalpie syté kapaliny } i' = 1307,08 [kJ \cdot kg^{-1}]$$

$$\text{Entalpie syté páry } i'' = 2760,8 [kJ \cdot kg^{-1}]$$

$$\text{Entalpie napájecí vody (} t_{NV} = 220^{\circ}\text{C) } i_{nv} = 945,1 [kJ \cdot kg^{-1}]$$

5.2 Počet teplosměnných trubek a celková průtočná plocha

Pro stanovení počtů trubek a celkovou průtočnou plochu je nutné si zvolit materiál a velikost trubek. Teplosměnnou plochu tvoří trubky $\varnothing 16 \times 1,5$ mm, které jsou z materiálu 08Ch18N10T.

Zvolené parametry

$$\text{Střední rychlost proudění primárního média (teoretická) } w_v = 4,5 [m \cdot s^{-1}]$$

$$\text{Vnitřní průměr trubky } d_1 = 13 [mm]$$

$$\text{Vnější průměr trubky } d_2 = 16 [mm]$$

Hmotnostní tok primárního média

$$\dot{m}_I = \frac{Q_{PG}}{(i_{I1} - i_{I2}) \cdot \eta_{PG}} \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (5.3)$$

$$\dot{m}_I = \frac{1707,5 \cdot 10^{-3}}{(1519 - 1328) \cdot 0,98} = 9122,26 \quad [kg \cdot s^{-1}]$$

kde η_{PG} [1].... účinnost parního generátoru

Celková teoretická průtočná plocha

$$S = \frac{\dot{m}_I}{w_v \cdot \rho} \quad [m^2] \quad (5.4)$$

$$S = \frac{9122,26}{4,5 \cdot 695,9} = 2,91 \quad [m^2]$$

Průtočná plocha jedné trubky

$$S_{tr} = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \quad [m^2] \quad (5.5)$$

$$S_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,013^2}{4} = 1,33 \cdot 10^{-4} \quad [m^2]$$

Teoretický počet trubek

$$n = \frac{S}{S_{tr}} \quad [1] \quad (5.6)$$

$$n = \frac{2,91}{1,33 \cdot 10^{-4}} = 21880 \quad [1]$$

Skutečný počet trubek

S ohledem na zanášení a následné zaslepování trubek během provozní činnosti parního generátoru, zvyšují počet trubek o 20 %.

$$n_{tr} = n \cdot 1,2 \quad [1] \quad (5.7)$$

$$n_{tr} = 21880 \cdot 1,2 = 26260 \quad [1]$$

Celková skutečná průtočná plocha

$$S_c = S_{tr} \cdot n_{tr} \quad [m^2] \quad (5.8)$$

$$S_c = 1,33 \cdot 10^{-4} \cdot 26260 = 3,49 \quad [m^2]$$

Skutečná rychlost proudění primárního média

$$w = \frac{\dot{m}_l}{S_c \cdot \rho} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (5.9)$$

$$w = \frac{9122,26}{3,49 \cdot 695,9} = 3,75 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

5.3 Součinitel přestupu tepla mezi primárním médiem a stěnou trubky

Součinitel přestupu tepla je určen na základě kritériálních rovnic.

Před výpočtem součinitele přestupu tepla je zapotřebí určit Reynoldsovo číslo. Charakteristický rozměr je v tomto případě vnitřní průměr trubky. Velikost Reynoldsova čísla nám určuje zda se jedná o proudění laminární ($Re < 2320$) nebo turbulentní ($Re > 10^4$) a také slouží pro výběr příslušného vzorce Nusseltova kritéria.

Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{w \cdot d_1}{\nu} \quad [1] \quad (5.10)$$

$$Re = \frac{3,75 \cdot 0,013}{0,119 \cdot 10^{-6}} = 409664 \quad [1]$$

Reynoldsovo číslo je větší než 10^4 , tudíž se jedná o turbulentní proudění.

Teoretická střední teplota stěny trubky

$$t_{trp} = \frac{t_{stř} + t_s}{2} \quad [^{\circ}C] \quad (5.11)$$

$$t_{trp} = \frac{314,6 + 293,3}{2} = 303,95 \quad [^{\circ}C]$$

kde t_s [$^{\circ}C$] – teplota syté páry v závislosti na tlaku $p_s = 7,8 \text{ MPa}$

Nusseltovo kritérium

Pro výpočet Nusseltova kritéria se musí stanovit Prandtlovo kritérium, které se zjišťuje v závislosti na středních teplotách primárního média a stěny trubky.

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{tr}} \right)^{0,25} \quad [1] \quad (5.12)$$

$$Nu = 0,023 \cdot 409664^{0,8} \cdot 0,9407^{0,43} \cdot \left(\frac{0,9407}{0,8894} \right)^{0,25} = 702 \quad [1]$$

kde $Pr [1]$ – Prandtlovo kritérium pro střední teplotu primárního média

$$t_{stř} = 314,6 [^{\circ}\text{C}], Pr = 0,9407 [1]$$

$Pr_{tr} [1]$ – Prandtlovo kritérium pro střední teplotu stěny trubky

$$t_{trp} = 303,95 [^{\circ}\text{C}], Pr_{tr} = 0,8894 [1]$$

Součinitel přestupu tepla mezi primárním médiem a stěnou trubky

$$\alpha_1 = Nu \cdot \frac{\lambda}{d_1} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.13)$$

$$\alpha_1 = 702 \cdot \frac{51,79 \cdot 10^{-2}}{0,013} = 27967 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

5.4 Součinitel přestupu tepla mezi stěnou trubky a parovodní směsí

Pro výpočet součinitele přestupu tepla na straně sekundárního média je nutné znát hustotu tepelného toku q . Jeho hodnota se nejprve volí a po následujících výpočtech je provedena zpětná kontrola voleného tepelného toku. Pokud se odhad liší o více než 1% což je toleranční mez, je potřeba provést iteraci až do momentu kdy dosáhne požadované přesnosti.

Volba hustoty tepelného toku

Hustota tepelného toku je stanovena iterační metodou.

$$q_v = 97700 \quad [W \cdot m^{-2}]$$

Součinitel přestupu tepla

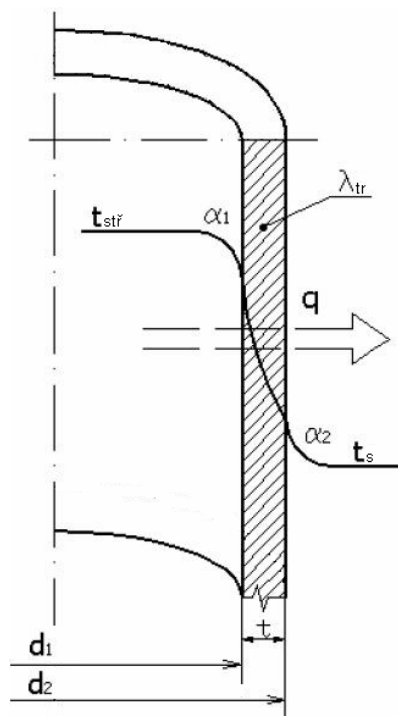
$$\alpha_2 = \frac{10,45}{3,3 - 0,0113 \cdot (T - 373)} \cdot q_v^{0,7} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.14)$$

$$\alpha_2 = \frac{10,45}{3,3 - 0,0113 \cdot (566,45 - 373)} \cdot 97700^{0,7} = 29184,5 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

kde T [K] – teplota syté páry při daném tlaku $p_s = 7,8 \text{ MPa}$

5.5 Součinitel prostupu tepla

Prostup tepla probíhá postupně konvekcí na vnitřní ploše trubky, kondukcí stěnou trubky o tepelné vodivost λ_{tr} a tloušťce t a konvekcí na vnější ploše trubky.



Obr. 5.1 průběh teploty napříč stěny trubky

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} \cdot \frac{d_2}{d_1} + \frac{d_2}{2 \cdot \lambda_{tr}} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (5.15)$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{27967} \cdot \frac{0,016}{0,013} + \frac{0,016}{2 \cdot 18,69} \cdot \ln \frac{0,016}{0,013} + \frac{1}{29184,5}} = 5982,7 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

kde λ_{tr} $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$ - součinitel tepelné vodivosti materiálu trubky

- pro materiál trubky 08Ch18N10T je $\lambda_{tr} = 18,69 \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$

Střední logaritmická teplota

Teplotní rozdíl mezi I. a II. médiem na vstupu

$$\Delta t_1 = t_{I1} - t_s \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (5.16)$$

$$\Delta t_1 = 330,7 - 293,3 = 37,4 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Teplotní rozdíl mezi I. a II. médiem na výstupu

$$\Delta t_2 = t_{I2} - t_s \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (5.17)$$

$$\Delta t_2 = 298,5 - 293,3 = 5,2 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

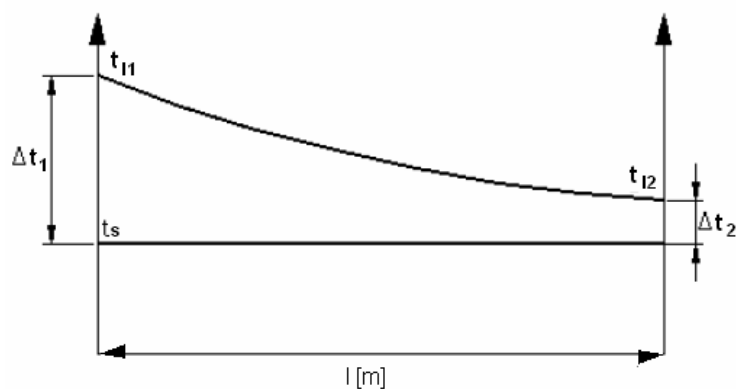
Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t_{\ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (5.18)$$

$$\Delta t_{\ln} = \frac{37,4 - 5,2}{\ln \frac{37,4}{5,2}} = 16,32 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Schématické znázornění průběhu teplot v primárním a sekundárním okruhu parního generátoru:

Dolní úsečka znázorňuje teplotu parovodní směsi v tělese parního generátoru. Horní křivka představuje průběh teploty primární média po délce parního generátoru.



Obr. 5.2 průběh teplot I. a II. Média

Zpětná kontrola tepelného toku

Zde je provedena kontrola dříve navržené hodnoty hustoty tepelného toku.

$$q = k \cdot \Delta t_{\text{ln}} \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (5.19)$$

$$q = 5982,7 \cdot 16,32 = 97637,7 \quad [W \cdot m^{-2}]$$

Zjištění odchylky tepelného toku

$$\Delta q = \left| \frac{q_v - q}{q} \right| \cdot 100 \quad [\%] \quad (5.20)$$

$$\Delta q = \left| \frac{97700 - 97637,7}{97637,7} \right| \cdot 100 = 0,06 \quad [\%]$$

Odchylka je menší než 1%, tudíž vyhovuje požadované mezi.

Kontrola navržené teploty stěny

Teplo sdělené 1m stěny trubky

$$q_l = q \cdot d_2 \cdot \pi \quad [W \cdot m^{-1}] \quad (5.21)$$

$$q_l = 97637,7 \cdot 0,016 \cdot \pi = 4907,8 \quad [W \cdot m^{-1}]$$

Povrchová teplota stěny trubky na straně I. média

$$t_{\text{trI}} = t_{\text{stř}} - \frac{q_l}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} \quad [^{\circ}C] \quad (5.22)$$

$$t_{\text{trI}} = 314,6 - \frac{4907,8}{\pi} \cdot \frac{1}{27967 \cdot 0,013} = 310,3 \quad [^{\circ}C]$$

Povrchová teplota stěny trubky na straně II. média

$$t_{\text{trII}} = t_s + \frac{q_l}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2} \quad [^{\circ}C] \quad (5.23)$$

$$t_{\text{trII}} = 293,3 + \frac{4907,8}{\pi} \cdot \frac{1}{29184,5 \cdot 0,016} = 296,65 \quad [^{\circ}C]$$

Střední teplota stěny trubky

$$t_{trSt} = \frac{t_{trI} + t_{trII}}{2} \quad [^{\circ}C] \quad (5.24)$$

$$t_{trSt} = \frac{310,30 + 296,65}{2} = 303,48 \quad [^{\circ}C]$$

Relativní chyba volené hodnoty střední teploty stěny trubky

$$\Delta t_{trRel} = \left| \frac{t_{trp} - t_{trSt}}{t_{trSt}} \right| \cdot 100 \quad [\%] \quad (5.25)$$

$$\Delta t_{trRel} = \left| \frac{303,95 - 303,48}{303,48} \right| \cdot 100 = 0,15 \quad [\%]$$

Odklon je přijatelný

5.6 Výpočet teplosměnné plochy a střední délky trubky

Celková teplosměnná plocha

$$S_t = \frac{Q_{PG}}{q} \quad [m^2] \quad (5.26)$$

$$S_t = \frac{1707,5 \cdot 10^6}{97637,7} = 17488,1 \quad [m^2]$$

Celková délka trubek parního generátoru

$$L = \frac{S_t}{\pi \cdot d_2} \quad [m] \quad (5.27)$$

$$L = \frac{17488,1}{\pi \cdot 0,016} = 347915 \quad [m]$$

Střední délka trubky

$$L_{tr} = \frac{L}{n_{tr}} \quad [m] \quad (5.28)$$

$$L_{tr} = \frac{347915}{26260} = 13,25 \quad [m]$$

5.7 Parní a tepelný výkon parního generátoru

Výparné teplo

$$l_v = i'' - i' \quad [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (5.29)$$

$$l_v = 2760,8 - 1307,08 = 1453,72 \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

Parní výkon parního generátoru při teplotě napájecí vody 220°C

$$G = \frac{Q_{PG}}{l_v + 1,01 \cdot (i' - i_{NV})} \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (5.30)$$

$$G = \frac{1707,5 \cdot 10^3}{1453,72 + 1,01 \cdot (1307,08 - 945,1)} = 938,54 \quad [kg \cdot s^{-1}]$$

Kontrola vypočteného parního výkonu vzhledem k zadanému

$$\Delta G_{PG} = \left| \frac{G_{PG} - G}{G} \right| \cdot 100 \quad [\%] \quad (5.31)$$

$$\Delta G_{PG} = \left| \frac{963,9 - 938,54}{938,54} \right| \cdot 100 = 2,7 \quad [\%]$$

Odklon je vyhovující

Vypočítaný tepelný výkon

$$Q_{PGv} = G \cdot (i'' - i_{NV}) \quad [kW] \quad (5.32)$$

$$Q_{PGv} = 938,54 \cdot (2760,8 - 945,1) = 1704107,1 \quad [kW]$$

Kontrola vypočteného tepelného výkonu vzhledem k zadanému

$$\Delta Q_{PGrel} = \left| \frac{Q_{PG} - Q_{PGvyp}}{Q_{PGvyp}} \right| \cdot 100 \quad [\%] \quad (5.33)$$

$$\Delta Q_{PGrel} = \left| \frac{1707,5 \cdot 10^3 - 1704107,1}{1704107,1} \right| \cdot 100 = 0,199 \quad [\%]$$

Odchylka mezi zadaným a vypočítaným tepelným výkonem je malá a vyhovuje požadované přesnosti.

6 ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá koncepcí svislých parních generátoru v jaderných elektrárnách.

V první části jsem zmínil současný stav a nastínil perspektivy dalšího rozvoje.

Druhá část zahrnuje princip jaderné elektrárny, jednotlivé části primárního okruhu, princip jejich funkce.

Ve třetí a čtvrté části jsem se pokusil charakterizovat všechny v současnosti vyvíjené koncepty evolučních jaderných reaktorů a princip fungování parního generátoru, koncepční řešení a jeho důležitosti v jaderné elektrárně.

V poslední části je proveden jednoduchý tepelný výpočet na základě zadaných parametrů. Úkolem výpočtu bylo zjistit velikost teplosměnné plochy a délky trubky.

Práce slouží jako základní obecný podklad pro návrh svislého parního generátoru pro výstavbu nových bloků jaderných elektráren

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HEJZLAR,R.: Stroje a zařízení jaderných elektráren, Díl 2. Vydavatelství ČVUT v Praze 2005., ISBN 80-01-03190-6.
- [2] KAKAC,S.: Boilers, evaporators and condensers, John Wiley, USA, New York 1991,CIP 90-22486 v knihovně VŠB, ISBN 0-0471-62170-6
- [3] JANEBA, B., KARTÁK,J.: Tepelné výpočty kotlů a parních generátorů, ČVUT Praha, 1982
- [4] *Wikipedia* [online]. 2001, 5.5.2010 [cit. 2010-05-06]. [Http://en.wikipedia.org](http://en.wikipedia.org). Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/European_Pressurized_Reactor>.
- [5] *World Nuclear Association* [online]. 2008 [cit. 2010-04-25]. [Www.world-nuclear.org](http://www.world-nuclear.org). Dostupné z WWW: <<http://www.world-nuclear.org/info/inf08.html>>.
- [6] *ČEZ* [online]. 2008 [cit. 2010-04-18]. [Www.cez.cz](http://www.cez.cz). Dostupné z WWW: <http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/koncepce_7.html>.
- [7] *AREVA/EDF* [online]. 2009 [cit. 2010-05-10]. [Www.epr-reactor.co.uk](http://www.epr-reactor.co.uk). Dostupné z WWW: <<http://www.epr-reactor.co.uk/scripts/ssmod/publigen /templates/Show.asp> >.
- [8] WAGNER, Wagner. *Osel* [online]. 2008 [cit. 2010-05-18]. [Www.osel.cz](http://www.osel.cz). Dostupné z WWW: <<http://www.osel.cz/index.php?clanek=3531>>.
- [9] *U.S.NRC* [online]. 2009 [cit. 2010-05-10]. [Www.nrc.gov](http://www.nrc.gov). Dostupné z WWW: <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1542/v13/>.
- [10] *BME NTI* [online]. 2007 [cit. 2010-05-18]. [Www.reak.bme](http://www.reak.bme.hu). Dostupné z WWW: <www.reak.bme.hu/MTAEB/files/konferencia_20070308/tpresent/Mitsubishi_MHI_Nuclear_Power_Technologies.pdf>.